

# 高性能ダイヤモンドコーティング工具の開発に関する研究

著者	羽生 博之
号	2910
発行年	2002
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10097/8183">http://hdl.handle.net/10097/8183</a>

氏 名	はにゅう ひろゆき 羽 生 博 之
授 与 学 位	博士 (工学)
学 位 授 与 年 月 日	平成 15 年 3 月 24 日
学位授与の根拠法規	学位規則第 4 条第 1 項
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 機械知能工学専攻
学 位 論 文 題 目	高性能ダイヤモンドコーティング工具の開発に関する研究
指 導 教 官	東北大学教授 坂 真澄
論 文 審 査 委 員	主査 東北大学教授 坂 真澄      東北大学教授 庄司 克雄 東北大学教授 橋田 俊之      東北大学助教授 神谷 庄司

## 論文内容要旨

### 第 1 章 序論

ダイヤモンドコーティングが気相合成法により可能になって以来, ダイヤモンドの優れた特性を複雑な三次元形状を持つ工具に付与するための試みがなされてきた. 切削工具においては, その切削抵抗が比較的小さなグラファイト材の切削においてダイヤモンドコーティングは早くから適用され, 従来から使用されていた超硬ソリッドエンドミルの 10~20 倍以上の耐久性を示し, 非常に大きな効果を上げてきた. しかしながら工業的な使用量に関してはグラファイトは微少であった. これに対し近年自動車産業等において大量に使用されてきているアルミニウム合金はダイヤモンドコーティングの適用により高能率加工が期待されている材料である. アルミニウム合金はジュラルミン等に代表される展伸材と, シリコンを含有し機械的強度や耐摩耗性を向上させたアルミニウム合金鋳物に大別されるが, 後者のシリコンを含有するもので特に共晶点を超えるシリコンを含有するものはハイシリコンアルミニウム合金と呼ばれ, その組織中に硬いシリコンの粒子を含有するようになる. 切削時に刃先がこの粒子と衝突すると刃先部分に大きな損傷を与え, 大きな工具摩耗を生じさせるため難削材として知られており, ダイヤモンドコーティングの適用が期待されていたが, ハイシリコンアルミニウムを切削した場合にはシリコン粒子とコーティングとの衝突の衝撃で, ダイヤモンドの耐摩耗性を発揮する以前にはく離が発生してしまっていた. 本研究ではハイシリコンアルミニウム合金の切削において十分適用し得る切削工具を開発するために必要なコーティングの付着強度を得るための母材表面の前処理開発を試みた. またハイシリコンアルミニウムの切削において最適なダイヤモンドコーティング工具形状の開発を行った. ダイヤモンドコーティングが持つ機械的強度の低さに着目し, 高いじん性を持つ微結晶ダイヤモンドコーティングをも新しく開発し, 高耐久性を実現した. さらに工具刃先表面の平滑性を微結晶化により実現し, 従来は不可能であったアルミニウム合金の仕上げ切削加工, ドライおよびセミドライ加工にも適用可能な高性能ダイヤモンドコーティングの開発を達成した.

## 第2章 超硬ソリッド回転工具へのダイヤモンドコーティング

ダイヤモンドコーティングは共有結合性物質であり、母材材料との反応性が極めて低い。このため超硬ソリッド工具にダイヤモンドコーティングを適用し、ハイシリコンアルミニウムの切削を行うには、強固な付着強度を実現するための母材表面の前処理が必要不可欠である。本研究では、

- ・界面における化学的結合強度の不足を補うための機械的投錨効果の確保
  - ・成膜時に触媒作用によりグラファイトを析出させるコバルトの除去
  - ・コーティングの強度と付着強度を向上させるための高核発生密度の実現
- の3点を実現するための前処理方法の開発を試みた。

本研究では特殊な化学処理を行うことにより、最適な母材表面粗さ、および表面形状を実現し、精密な工具形状の寸法精度を保ちつつ、ハイシリコンアルミニウム合金の切削を可能とするダイヤモンドコーティングソリッド工具の開発に成功した。

またダイヤモンドコーティング工具の寿命を保証するための試験方法を開発し、合わせて開発した不良品の再生手法を利用して生産における品質安定化と低価格化を実現した。

## 第3章 工具形状の最適化

20%以上も組織中にシリコンを含有するハイシリコンアルミニウム合金中に存在する極めて大きなシリコン粒子との衝突に対しては、その切削時に刃先のコーティングに加わる負荷は巨大なものとなる。2章において最適化した前処理をもってしてもダイヤモンドコーティングのはく離を発生させ得る材料に関しては、工具自体の形状を最適化する必要があると考え、ドリルにおいて専用形状の開発を試みた。シンニング形状、ねじれ角、コーティング膜厚等をパラメータとして数種のドリルを製作し、実際の切削試験よりのはく離を発生させない最適なドリル形状を見い出した。ここでは切削抵抗と刃先のコーティングに加わる負荷量との最適値として20度の溝ねじれ角と負のすくい角を持つシンニング形状のものが良好な耐久性を示し、23%シリコンを含有するアルミニウム合金に対しても良好な耐久性を示すことができた。

## 第4章 ダイヤモンドコーティング材質の高じん性化

ダイヤモンドコーティングが持つ欠点として、ダイヤモンド結晶が基板表面に垂直方向に成長した柱状構造を有しているため、本質的に柱状の粒界に沿ってき裂が進展しやすく機械的強度が低いということが挙げられる。本研究ではこの点に着目しダイヤモンド結晶を微細化して組織を変えることにより、ダイヤモンドコーティングの高じん性化を試みた。具体的な測定により評価したところ、図4-3に示すように従来結晶のダイヤモンドコーティングの2倍程

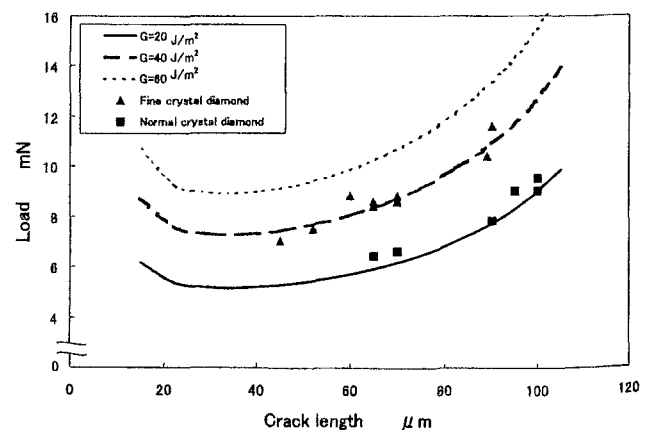


図4-3 き裂進展抵抗曲線

度のじん性を得ることができた。この高じん性のコーティングを使用してハイシリコンアルミニウム合金の穴あけ加工を行ったところ、従来コーティングの 1.6 倍の耐久性を得た。またその組織中に非常に硬いセラミックス粒子を分散させる金属基複合材料の切削加工においては、コーティングが高じん化されたことによりコーティングの欠け落ちを効果的に防止でき、従来コーティングの 4 倍もの切削耐久性を示すことが可能であった。

## 第 5 章 平滑表面コーティングとその切削性能

ダイヤモンドコーティングは通常図 5-1(a)に示すように鋭く尖ったダイヤモンド粒子の集合体からなる表面状態を呈している。この凸凹した表面を持つ切刃で切削を行うと、ダイヤモンド粒子の形状が被削材に転写されるため良好な被削材面粗さを得ることは不可能であった。本研究では微結晶ダイヤモンドコーティングを母材表面に被覆するにあたって、コーティング表面の平滑化を達成するために母材表面状態の最適化を試み、図 5-1(b)に示すような非常に平滑なダイヤモンドコーティング表面を達成した。具体的な工具への応用としては前処理後の母材表面の最大粗さを  $1\mu\text{m}$  以下とし、加えて刃先の丸みを  $5\mu\text{m}$  以下とすることで良好な仕上げ面粗さを得ることができる刃先状態を達成した。この刃先状態を持つエンドミルにてアルミニウム展伸材料の A7075 の切削を行ったところ、図 5-4 に示すように従来では不可能であった、鋭く刃先を整えたノンコート超硬ソリッドエンドミルで行った切削と同等の被削材面粗さを得ることができた。

また従来のダイヤモンドコーティングを用いたアルミニウム切削では、ダイヤモンド結晶の谷部にアルミニウムが擦り付けられて機械的に溶着が発生してしまうことがあった。本研究で開発した平滑表面を持つ微結晶コーティングをソリッドドリルの刃先に適用することで従来不可能であったアルミニウム合金のドライおよびセミドライ切削が可能となった。

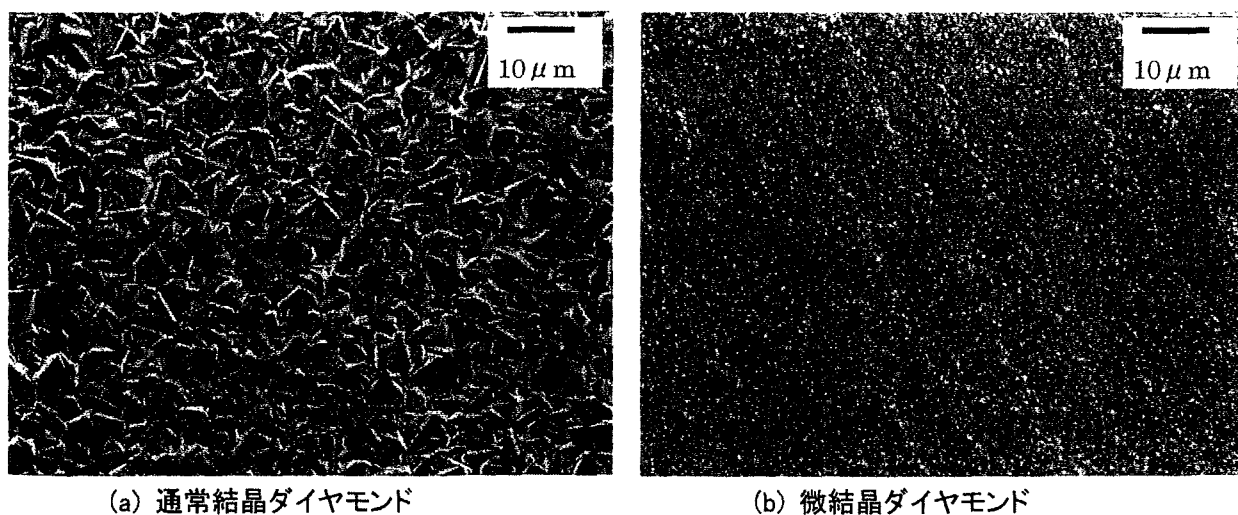


図5-1 ダイヤモンドコーティング表面状態

Cutting condition	
Tool	2 flute square endmill, 10mm
Workpiece	JIS A7075
Depth of cut	0.1 x 10 mm
Cutting speed	400 m/min
Feed rate	0.05 mm/tooth
Coolant	Emulsion

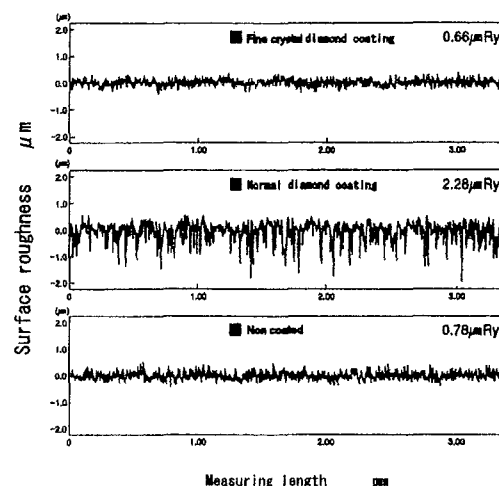


図5-4 被削材面粗さ比較

## 第6章 ダイヤモンドコーティング工具形状の最適化のための新しい設計手法

本研究における工具耐久性能の改善に関する基本的な指針となった切削時におけるコーティングの機械的負荷について、さらに定量的な検討を行った。具体的には工具刃先形状の変化に伴う切削時のコーティングと母材との応力状態を数値計算し、応力状態の変化を把握して実際の切削耐久性と対比することにより、コーティングの強度に基づく工具の高性能化を検証するとともに具体的な設計基準を見出すことを試みた。切削が被削材と接触することにより発生する負荷と、母材とコーティングの線膨張係数の差により発生する残留応力とをそれぞれ有限要素法により計算し、これらの応力を重ね合わせて実際の切削時に刃先のコーティング内に生じる応力を見積もった。さらにこれらの解析を行った刃先の形状に関して、実際に工具を作製し切削試験を行ったところ、コーティングの界面側にて大きな引張り応力が発生しやすい刃先形状のものは低い耐久性を示し、本手法が実際の切削試験における工具の耐久性と強い相関性を持つ事実を確認できた。最適な工具形状の候補を予め絞ることが可能となる新たな設計基準を得ることが可能となった。

## 第7章 結論

本研究では最も過酷な条件下で使用され、しかも高い耐久性と精度が要求されるソリッド形状の切削工具へのダイヤモンドコーティングの適用を行い、これら切削工具の性能向上を試みた。本研究により、従来不可能であったハイスリコンアルミニウムに適用可能な高性能ダイヤモンドコーティング工具の開発に成功した。また従来のダイヤモンドコーティングが持つ、じん性の低さを克服するためコーティングの微結晶化を試み成功した。これによりじん性値を従来の2倍に向上し高い切削耐久性を得ることが可能となった。また同微結晶コーティングにより表面の平滑化も達成し、従来不可能であったアルミニウム合金の仕上げ切削加工およびドライ、セミドライ切削加工が可能な切削工具の開発に成功した。このように本研究においては、気相合成ダイヤモンドを切削工具の耐摩耗性コーティングに適用する際の様々な問題点を解決し、ダイヤモンドコーティングの新たな可能性を切り開いた。

# 論文審査結果の要旨

ダイヤモンドの化学気相合成法が確立されて以来、工具摩耗が激しく切削困難な材料に対して、ダイヤモンドをコーティングした工具を適用することが期待されてきた。しかしこれらの材料の切削時には大きな機械的負荷が発生してダイヤモンドコーティングを破壊し、脱落させるという重大な問題があり、十分な耐久性を有する工具はこれまでに得られていなかった。

著者は、これらの材料の切削に適した高性能ダイヤモンドコーティングの開発に取り組み、優れた耐久性能を持つ切削工具の実用化に成功した。本論文はこれらの開発についてまとめたものであり、全編7章よりなる。

第1章は序論である。

第2章では、気相合成ダイヤモンドの十分な付着強度を確保するための超硬合金基板の前処理について検討している。機械的投錨効果を確保する表面状態の最適化、グラファイトの析出を防止するためのコバルトの除去、ダイヤモンドの高い核発生密度の実現などの重要性を明らかにしている。

第3章では、機械的負荷の大きな被削材に対して適用可能なドリルの開発について検討し、工具刃先の最適な形状が存在することを見い出している。これは切削工具の設計上重要な新規知見である。

第4章においては、ダイヤモンドコーティングそのものの強度を向上させるという手法を導入し、より高性能な工具の開発を試みている。新たに条件を最適化することにより、耐摩耗性を犠牲にすることなく結晶粒を微細化したコーティングの合成に成功し、この新規コーティングが通常のものの二倍程度のじん性を有することを明らかにしている。これは他に先駆けた工学上有益な成果である。

第5章では、第4章において述べた微結晶ダイヤモンドコーティング表面の平滑性に着目し、仕上げ加工への適用や、さらに潤滑、冷却材の使用を大きく低減させるドライおよびセミドライ条件による切削の可能性を検証している。特に後者は環境保全の観点からも有益な成果である。

第6章では、数値計算によるコーティング中の応力の評価と、それに基づく工具の最適設計の可能性を検討し、コーティング中の残留応力と切削時の機械的負荷とを合成した応力が、実際の切削試験における工具の耐久性と強い相関性を持つ事実を見い出している。これは有用な知見である。

第7章は結論である。

以上要するに本論文は、気相合成ダイヤモンドを切削工具の耐摩耗コーティングとして応用する際の様々な問題点を克服し、切削加工に新たな可能性を拓いたものであり、機械知能工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。